Vol.12, No.3, Fall 2023, pp.171-191 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2023.79999.1313 Open access

Evaluating Fire Hazard Potentials using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Logistic Regression Approaches in Golestan National Park

Mehdi Teimouri[a*], Aiding Kornejady[b]

[a] *Assistant Professor in Watershed Management, University of Bojnord, Bojnord, Iran*
[b] *Research Department of Natural Resources, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran*

Received: 11 December 2022 Revised: 14 February 2023 Accepted: 27 February 2023

Abstract

Nowadays, the creation of a spatial distribution map for assessing fire risk is widely recognized as a crucial management tool at various levels. This tool helps monitoring natural resource sustainability and the effective control of this environmental hazard. Through the integration of field operations, remote sensing data, geographic information system techniques, and diverse statistical methods, it becomes feasible to develop a dependable spatial prediction of fire hazard potential for different regions. In this research, nine factors were identified to be effective in fire risk modeling, including altitude, slope, aspect, distance from the road, NDVI, LST, TWI, and TPI. Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) and Logistic Regression (LR) were employed to identify risk areas and determine the most significant factors influencing the occurrence and spread of fire. Historical fire areas were identified using Google Earth Engine and MODIS images. The initial results showed that both models assign the highest coefficients to NDVI, LST, and distance from the road. However, during the verification phase, the performance characteristic curve of both models was relatively similar (0.847 for FAHP method and 0.837 for LR method). Upon examining historical fire pixels, it was found that FAHP method correctly identified approximately 87% of the pixels belonging to classes with high and very high risk, whereas LR method only overlapped with 22% of these pixels. This suggests that FAHP method is better at identifying areas with a high risk potential compared to LR method. While it is important to acknowledge that the creation of risk prediction maps using various models cannot completely eliminate all fires, it can greatly diminish their frequency and help their management by offering effective solutions.

Keywords: Multi-criteria Decision Making, Hazard Prediction, Google Earth Engine, Performance Characteristic Curve, MODIS

---

*. Corresponding author: Mehdi Teimouri Email: m.teimouri@ub.ac.ir Tel:+9809306103602

How to cite this Article: Teimouri, M., & Kornejady, A. (2023). Evaluating fire hazard potentials using fuzzy analytic hierarchy process and logistic regression approaches in Golestan National Park *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(3), 171-191.
DOI:10.22067/geoeh.2023.79999.1313

Geography and Environmental Hazards
Volume 12, Issue 3 - Number 47, Fall 2023
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79999.1313

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شمارۀ چهل و هفتم، پاییز ۱٤۰۲، صص ۱۹۱-۱۷۱

مقاله پژوهشی

ارزیابی پتانسیل خطر آتش‌سوزی با استفاده از رویکردهای تحلیل سلسله مراتبی فازی و رگرسیون لجستیک

مهدی تیموری[1] – استادیار گروه مهندسی طبیعت. دانشکده کشاورزی شیروان. دانشگاه بجنورد. بجنورد. ایران.
آیدینگ کرنژادی– استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۹/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱٤۰۱/۱۱/۲۵ تاریخ تصویب: ۱٤۰۱/۱۲/۸

چکیده

امروزه تهیه نقشه توزیع مکانی خطر آتش‌سوزی یکی از ابزارهای ضروری مدیریت در سطوح مختلف جهت پایش پایداری منابع طبیعی و کنترل این مخاطره محیط‌زیستی است. تلفیق عملیات میدانی، داده‌های دورسنجی، تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و آماری مختلف می‌تواند پیش‌بینی فضایی قابل‌اعتمادی از پتانسیل خطر آتش‌سوزی برای مناطق مختلف ایجاد کند. در این تحقیق از ۹ عامل مؤثر در مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی شامل عوامل ارتفاع، شیب، جهت، انحنای دامنه، فاصله از جاده و شاخص‌های NDVI، LST، TWI و TPI با دو روش تحلیل فازی سلسله مراتبی و رگرسیون لجستیک برای شناسایی مناطق خطر و تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر در بروز و گسترش آتش استفاده شد. برای شناسایی مناطق حریق تاریخی نیز از سامانه ابری گوگل ارث انجین و تصاویر مادیس استفاده شد. نتایج اولیه نشان داد در هر دو مدل، عوامل NDVI، LST و فاصله از جاده بیشترین ضرایب را به خود اختصاص داده‌اند. در مرحله صحت سنجی نیز اگرچه منحنی مشخصه عملکرد هر دو مدل، نسبتاً یکسان (مقدار ۰/۸٤۷ در روش تحلیل

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۳۰٦۱۰۳٦۰۲ Email: m.teimouri@ub.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

تیموری، مهدی؛ کرنژادی، آیدینگ؛ ۱٤۰۲. ارزیابی پتانسیل خطر آتش‌سوزی با استفاده از رویکردهای تحلیل سلسله مراتبی فازی و رگرسیون لجستیک. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۲(۳). صص ۱۹۱-۱۷۱

https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79999.1313

سلسله مراتبی فازی و مقدار ۰/۸۳۷ در روش رگرسیون لجستیک) بود، با بررسی پیکسل‌های حریق تاریخی مشخص شد در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی حدود ۸۷ درصد پیکسل‌های طبقات با خطر زیاد و خیلی زیاد و در روش رگرسیون لجستیک فقط ۲۲ درصد پیکسل‌های طبقات مزبور با مناطق دارای سابقه حریق همپوشانی داشته‌اند. لذا به نظر می‌رسد روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی بهتر از روش رگرسیون لجستیک توانسته مناطق با پتانسیل خطر بالا را شناسایی کند. اگرچه تهیه نقشه‌های پیش‌بینی خطر توسط مدل‌های مختلف از وقوع کلیه حریق‌ها جلوگیری نخواهد کرد ولی می‌توان با ارائه راهکارهای مدیریتی، وقوع آن را کاهش داده و کنترل آن را تسهیل نمود.

کلیدواژه‌ها: تصمیم‌گیری چندمعیاره، پیش‌بینی خطر، گوگل ارث انجین، منحنی مشخصه عملکرد، ماهواره مادیس.

۱- مقدمه

جنگل‌ها یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی تجدید شونده بوده و به‌عنوان سوپاپ اطمینان، تعادل اکولوژیکی جهانی و پایداری تمدن بشر را حفظ می‌کنند (نوتاماکت و استراتولیاس[1]، ۲۰۲۱). اگرچه معیارهای مختلفی با توجه به نوع اقلیم و شرایط جغرافیایی منطقه به‌عنوان شاخص‌های مدیریت پایدار منابع طبیعی وجود دارد، لیکن اصول اولیه تمام آن‌ها بر اساس سلامت اکوسیستم، تجدید حیات، عدم روند تخریب و عدم‌تغییر کاربری آن استوار است (زارع چاهوکی، ۱۳۹۸). یکی از مهم‌ترین مصادیق تخریب و تهدید آن، آتش‌سوزی سیستم‌های جنگلی در سطح جهان است (جعفری و همکاران، ۲۰۱۹). وقایع آتش‌سوزی اثرات منفی بر تنوع زیستی، بیلان اکولوژیکی، حیات‌وحش، فرایندهای فیزیکی و شیمیایی زمین، تغییر اقلیم، خصوصیات هیدرولوژیکی، فعالیت‌های انسانی و اجتماعی–اقتصادی دارد (ونکاتش[2] و همکاران، ۲۰۲۰). اگرچه مهار کامل این پدیده امکان‌پذیر نیست، ولی با اقداماتی می‌توان به پیشگیری بخشی و کاهش اثرات سوء آن دست یافت. یکی از اقدامات ممکن، پهنه‌بندی خطر از نظر احتمال وقوع و تعیین مناطق با پتانسیل بالای حریق است (اسکندری و اسکندری، ۱۴۰۰). به‌صورت کلی، چهار عامل توپوگرافی، اقلیمی، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی به‌عنوان عوامل اشتعال‌زا در جنگل‌ها محسوب می‌شوند (چلاک و سونار[3]، ۲۰۲۰). همچنین روش‌های مختلف مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی شامل رگرسیون خطی، رگرسیون لجستیک، تحلیل تصمیم چند معیاره و روش‌های همپوشانی وزنی مورداستفاده قرار گرفته است (عابدی، ۲۰۲۲؛ فرامرزی و همکاران، ۲۰۲۱). روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های مکانی با موفقیت بالا در شناسایی چنین مناطقی در بسیاری از مناطق دنیا مورداستفاده قرار گرفته است (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۶). مثلاً

1 Nuthammachot and Stratoulias
2 Venkatesh
3 Çolak and Sunar

در ایران، عابدی قشلاقی و همکاران (۱۳۹۷) در تحقیق خود به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و ساج در جنگل‌های نوشهر پرداخته و نتیجه گرفتند که حدود ۳۲ درصد منطقه در کلاس خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارد. تومار[1] و همکاران (۲۰۲۱) نیز به ارزیابی خطر حریق در جنگل‌های هند با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و مدلسازی مکانی پرداخته و مناطق با طبقات مختلف حریق را مشخص نمودند. بوسیکو[2] و همکاران (۲۰۱۹) نیز به مدلسازی آتش تحت شرایط تغییر اقلیم در جنگل‌های ایتالیا پرداخته و نتایج آن را قابل‌قبول دانستند.

در سال‌های اخیر تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری نوین چندمعیاره در گستره مکانی و همچنین مدل‌های آماری جدیدتر، چارچوب مناسبی را به‌منظور ارزیابی مناطق مستعد آتش‌سوزی قرار داده است (نوو[3] و همکاران، ۲۰۲۰). مثلاً اردین و چاگلار[4] (۲۰۲۱) و عابدی قشلاقی و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی خطر آتش‌سوزی با ترکیب روش تحلیل سلسله مراتبی با منطق فازی پرداخته و نتایج حاصله را منطقی و قابل‌قبول‌تر نسبت به روش تحلیل سلسله مراتبی دانستند. یاتیش[5] و همکاران (۲۰۱۹) به استفاده از دو روش رگرسیون لجستیک و روی‌هم‌گذاری وزنی در ترسیم مناطق خطر جنگل‌های هند پرداخته و روش رگرسیون لجستیک را روش مناسب‌تری بخصوص در شرایط وجود داده تاریخی عنوان نمودند.

یکی از ملزومات مدلسازی آتش، دسترسی به داده‌های باکیفیت زمانی و مکانی مناسب است (پیائو و همکاران، ۲۰۲۲). ماهواره مادیس این قابلیت را همراه با ارائه محصولات متنوع پردازشگر فراهم آورده است. مثلاً شریف‌نژاد و همکاران (۱٤۰۰) به ارزیابی قابلیت محصولات آتش سنجنده مادیس در استان گلستان پرداخته و اذعان نمودند که این محصولات فقط نیمی از حریق‌های صورت گرفته را نشان دادند و در مورد آتش‌سوزی‌های جزئی ضعیف عمل می‌کنند که این موضوع را به مقیاس مورداستفاده این محصولات که در سطوح بزرگ کارایی دارد مرتبط دانستند. هیسلوپ[6] و همکاران (۲۰۲۰) نیز به بررسی سری زمانی داده‌های حریق جنگل‌ها در تصاویر مادیس و شاخص نسبت نرمال آتش‌سوزی پرداخته و نتیجه گرفتند که بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸، حدود ۱۸۰ میلیون هکتار از ۲ میلیارد هکتار جنگل‌های مناطق معتدل مورد مطالعه، دچار حریق شده و روند افزایش حریق در جنگل‌های شیلی و روند کاهشی در جنگل‌های چین مشاهده می‌شود.

هرچند تصاویر ماهواره‌ای مثل مادیس کمک شایانی در این امر می‌کنند، حجم بالا و زمان طولانی پردازش محدودیت‌هایی را به همراه دارد. لذا استفاده از محصولات ماهواره‌ای که دارای قابلیت تحلیل بدون ذخیره داده‌ها

1 Tomar
2 Busico
3 Novo
4 Erdin and Çağlar
5 Yathish
6 Hislop

باشند بسیار مفید به نظر می‌رسد (پیائو و همکاران، ۲۰۲۲). این موضوع توسط سامانه پردازش ابری گوگل ارث انجین مهیا شده است. چاوداراوغلو[1] (۲۰۲۱) و پیائو[2] و همکاران (۲۰۲۲) به مدت‌زمان پردازش سریع این سامانه در تشخیص مناطق حریق اشاره داشته‌اند.

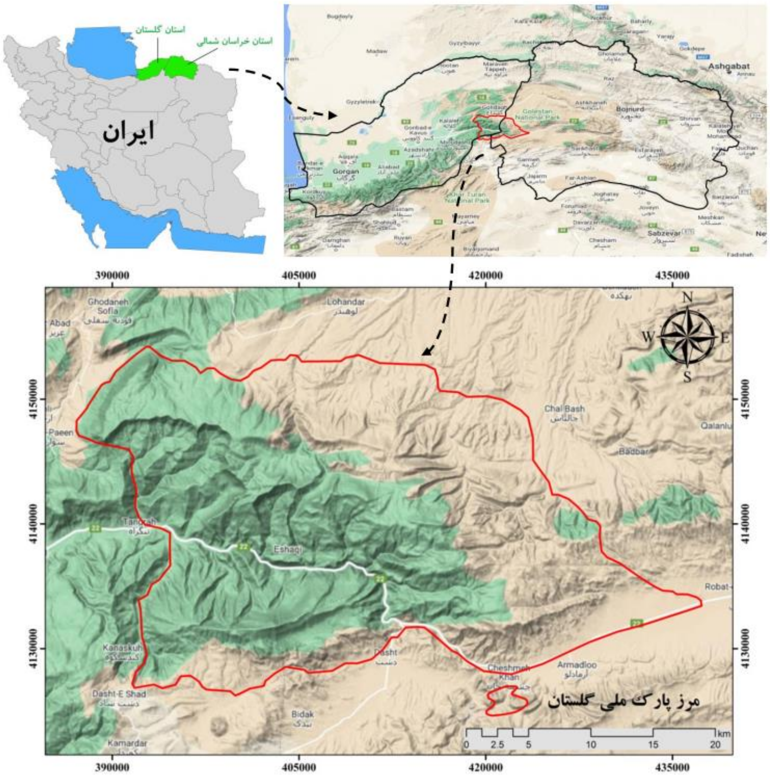
بررسی سوابق مطالعاتی گذشته در داخل و خارج از ایران نشان می‌دهد که جهت تعیین پتانسیل خطرات آتش‌سوزی‌ها، استفاده از داده‌های میدانی و مدلسازی مکانی توأم با داده‌های تاریخی ماهواره‌ای که قابلیت تحلیل سری زمانی حریق را فراهم می‌سازد، بسیار مناسب هستند. لذا در این تحقیق از قابلیت مدلسازی فازی در تحلیل سلسله مراتبی و مقایسه آن با مدل رگرسیون لجستیک همراه با صحت‌سنجی تصاویر حریق ماهواره مادیس در محیط گوگل ارث انجین برای تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر در گسترش و تهیه مدل و نقشه خطر آتش‌سوزی در پارک ملی گلستان استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

پارک ملی گلستان به‌عنوان قدیمی‌ترین پارک ملی ثبت شده در ایران در محدوده ۲ استان گلستان و خراسان شمالی واقع است. محدوده پارک بین طول‌های جغرافیایی "۹ '۴۳ °۵۵ تا "۴۲ '۱۷ °۵٦ شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۲۱ '۱٦ °۳۷ تا "۵۹ '۳۱ °۳۷ شمالی واقع است و مساحتی حدود ۸۵۸ کیلومترمربع و محیط ۱٤۵ کیلومتر دارد. اقلیم منطقه در بخش‌های مرتفع، معتدل کوهستانی و در ارتفاعات کمتر، اقلیم معتدل و نیمه مرطوب است. در شکل ۱ موقعیت پارک ملی گلستان در ایران و استان‌های خراسان شمالی و گلستان نشان داده شده است.

1 Cavdaroglu
2 Piao



شکل ۱- موقعیت پارک ملی گلستان در ایران و استان‌های خراسان شمالی و گلستان

۲-۲- داده‌های مورداستفاده

ازآنجایی‌که ماهواره مادیس، اولین ماهواره‌ای است که از سنجنده‌های حرارتی برای پایش آتش‌سوزی‌ها و ثبت تصاویر آن‌ها استفاده می‌کند (گیگ لیا[1] و همکاران، ۲۰۰۳)، لذا از این ماهواره برای شناسایی نقاط آتش‌سوزی ضمن تطبیق با گزارش‌های اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان استفاده شد. برای پردازش داده‌های مزبور از سامانه پردازشی ابری گوگل ارث انجین استفاده شد. شاخص مورداستفاده در شناسایی آتش‌سوزی‌ها شاخص نسبت سوختگی نرمال شده[2] است (معادله ۱).

$$NBR = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR) \quad (۱)$$

که NIR باند مادون‌قرمز نزدیک و SWIR باند مادون‌قرمز طول‌موج کوتاه است.

---

1 Giglioa
2 Normalized Burn Ratio (NBR)

با گذشت مدت‌زمانی از آتش‌سوزی و رشد مجدد/ بازسازی پوشش گیاهی، شاخص NBR تأثیر کمتری دارد. لذا شاخص $dNBR$ به‌عنوان ابزاری برای درک بهتر وسعت و شدت آتش، پس از محاسبه تفاوت بین شرایط قبل و بعد از آتش‌سوزی (معادله ۲) ارائه شد (فاسناچت[1] و همکاران، ۲۰۲۱).

$$dNBR = PrefireNBR - PostfireNBR \quad (۲)$$

با توجه به لحاظ نمودن موقعیت مکانی، زمانی، مطالعات قبلی و نظرات کارشناسان محلی، تعداد ۹ عامل شامل ارتفاع، شیب، جهت، فاصله از جاده، انحنای دامنه و همچنین شاخص‌های LST[2]، NDVI[3]، TPI[4]، TWI[5] که به ترتیب بیانگر دمای سطحی، تراکم پوشش گیاهی، موقعیت توپوگرافی و رطوبت منطقه هستند، به‌عنوان عوامل مؤثر در شروع و گسترش آتش‌سوزی جهت استفاده در مدل‌های تحقیق انتخاب شد.

ازآنجایی‌که نوع پوشش گیاهی در هر منطقه معمولاً به‌صورت ترکیبی از جوامع گیاهی مختلف است، لذا استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای بسیار معمول و کاربردی است. یکی از این شاخص‌ها، شاخص NDVI است که بیانگر فرایند فتوسنتز و درنتیجه محتوای رطوبت گیاه و خاک است (لی[6] و همکاران، ۲۰۲۱) که در تصاویر لندست ۸ از معادله ۳ قابل‌تعیین است.

$$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R) \quad (۳)$$

که در رابطه فوق، NIR، باند مادون‌قرمز نزدیک (۰/۹–۰/۷۶ میکرومتر) و R، محدوده باند قرمز (۰/۶۹–۰/۶۳ میکرومتر) است (یاتیش و همکاران، ۲۰۱۹).

همچنین ازآنجایی‌که پتانسیل حریق با کاهش رطوبت دامنه افزایش پیدا می‌کند، استفاده از شاخصی که بیانگر رطوبت سطحی و کنترل کننده گسترش آتش است بسیار حائز اهمیت است (ماسیندا[7] و همکاران، ۲۰۲۱). معمول‌ترین شاخصی که به تمایل پیکسل‌ها در نگهداشت رطوبت می‌پردازد شاخص TWI است (ماتیوی و همکاران، ۲۰۱۹). لذا در این تحقیق از شاخص مزبور (معادله ٤) استفاده شده است.

$$TWI = ln(\alpha/tan\beta) \quad (٤)$$

که α مساحت تجمعی زهکشی بالادست و $\tan\beta$ زاویه شیب هر نقطه است که در این مطالعه برای تهیه فایل آن از نرم‌افزار SAGA-GIS (کنراد[8] و همکاران، ۲۰۱۵) استفاده شده است. مناطق مستعد به تجمع آب (شبکه زهکشی) مقادیر بالای شاخص و مناطقی که زهکشی خوبی دارند مقادیر کمتری دارند. اگرچه بررسی دقیق این شاخص به

1 Fassnacht
2 Land Surface Temperature
3 normalized difference vegetation index
4 Topographic Position Index
5 topographic wetness index
6 Li
7 Masinda
8 Conrad

نوع اقلیم، نوع دامنه و مقیاس تهیه آن بستگی دارد (آگرن[1] و همکاران، ۲۰۱٤). از سایر متغیرهای اقلیمی مهم در شیوع و گسترش آتش نیز می‌توان به دمای سطح زمین اشاره کرد که برای بررسی دقیق آن از شاخص LST و محصول آماده MOD11A2 که داده‌های حداقل و حداکثر دمایی را به‌خوبی ثبت می‌کند (آیانلاده[2]، ۲۰۱٦) استفاده می‌شود. برای بررسی داده‌ها و شاخص‌های ذکر شده، تمام عوامل در قالب فایل رستری با اندازه پیکسل ۳۰ متری تهیه شدند.

۲-۳- روش AHP فازی

AHP یک رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره است که در آن معیارها در یک ساختار سلسله مراتبی سازمان‌دهی می‌شوند (زارعیان و همکاران، ۲۰۲۱). در این رویکرد، اهمیت نسبی معیارها بر اساس وزن آن‌ها (با توجه به نظرات کارشناسان، متخصصان و بررسی سوابق قبلی) مشخص شده و ماتریس مقایسات زوجی ساخته می‌شود که نشان‌دهنده میزان قوت هر معیار (از عدد یک تا ۹) نسبت به سایر معیارها است. سپس این مقادیر نسبی، به کمیت‌های عددی تبدیل شده و درنهایت باید بزرگ‌ترین مقدار ویژه (λ_{max}) در محاسبه شاخص ناسازگاری (CI) محاسبه شود (معادله ۵).

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (۵)$$

که n تعداد معیارهای مورد بررسی است. نرخ ناسازگاری نیز با مقایسه شاخص ناسازگاری با شاخص تصادفی که توسط ساعتی[3] (۱۹۸٤) ارائه شده از معادله ٦ قابل محاسبه است.

$$CR = CI/RI \quad (٦)$$

چنانچه عدد مزبور کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد سازگاری سیستم قابل‌قبول است وگرنه باید در قضاوت‌ها تجدیدنظر نمود.

گاهی اوقات هنگام ایجاد یک ماتریس مقایسه نمی‌توان مقادیر واضحی را برای مقایسه معیارهای مختلف تعیین کرد. در این موارد می‌توان از منطق فازی بهره گرفت که اعتبار هر معیاری را با طیف خاکستری (عدد بین صفر و یک) نشان می‌دهد. لذا با اعمال تابع عضویت خطی و جمع لایه‌های وزن‌دار، نقشه نهایی خطر آتش‌سوزی به‌صورت رستری تهیه می‌شود. بدیهی است هرچه مقدار پیکسلی به عدد یک نزدیک شود بیانگر خطر بالاتر است. همچنین نقشه تهیه شده با طبقه‌بندی مجدد و به روش جنکز (آجین[4] و همکاران، ۲۰۱۷) قابل‌تقسیم به طبقات مختلف خواهد بود.

1 Ågren
2 Ayanlade
3 Saaty
4 Ajin

۲-٤-روش رگرسیون لجستیک

رگرسیون لجستیک یک روش از مدل‌های موسوم به خطی تعمیم‌یافته است که قابلیت پیش‌بینی خروجی‌های مجزا از مجموعه‌ای پیوسته یا غیرپیوسته را دارد. استفاده از این روش در مجموعه داده‌های غیرخطی بسیار کارا بوده و هدف اصلی آن یافتن بهترین مدل برای بیان رابطه بین یک متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل است (چویکو[1] و همکاران، ۲۰۱۰). معادله اساسی مدل مزبور به‌صورت معادله ۷ است.

$$ln(p/(1-p)) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_n x_n \quad (۷)$$

که p احتمال وقوع پیکسل مکانی آتش‌سوزی، x عوامل مؤثر و β ضرایب اکتشافی متغیرهای معادله هستند (حیدری و همکاران، ۱٤۰۰). در تحقیق حاضر، متغیر وابسته وقوع یا عدم وقوع آتش‌سوزی و عوامل ۹ گانه، متغیرهای مستقل هستند.

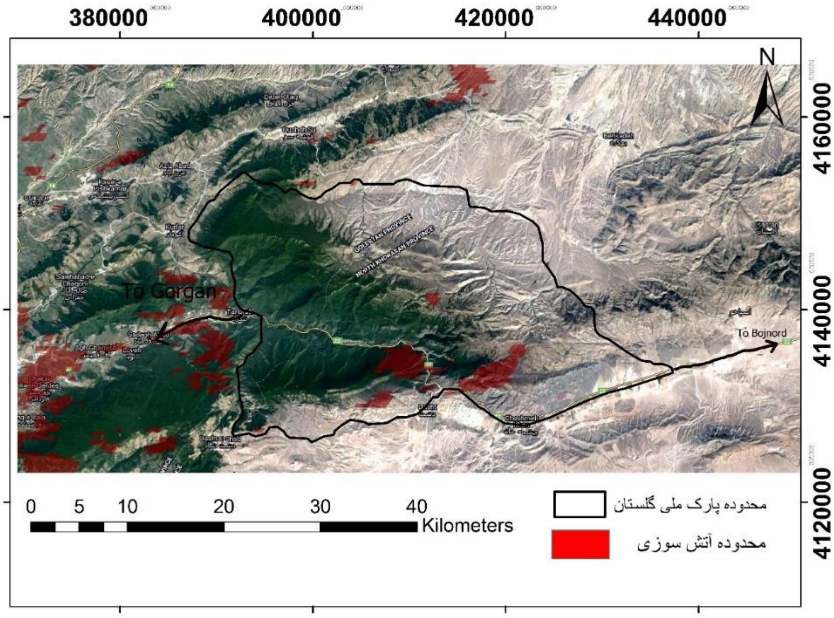
۲-٥- منحنی ROC

ازآنجایی‌که اعتباریابی یک فرایند ضروری در ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی است، از روش منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC-AUC) که یکی از متداول‌ترین روش‌های کمی برای پهنه‌بندی و ارزیابی مخاطرات طبیعی استفاده می‌شود که انعطاف‌پذیری زیادی در بیان درجه حساسیت مدل‌ها دارد (فام و همکاران، ۲۰۲۱). این منحنی بر اساس تقسیم درصد مثبت‌های صحیح بر درصد منفی‌های کاذب ترسیم می‌شود و سطح زیر آن بیانگر احتمال پیش‌بینی صحیح یک پیکسل تصادفی است (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷) و به‌صورت محدوده‌های ۰/٦-۰/٥، ۰/۷-۰/٦، ۰/۸-۰/۷، ۰/۹-۰/۸ و ۱-۰/۹ به ترتیب پیش‌بینی ضعیف، متوسط، خوب، خیلی خوب و عالی دسته‌بندی می‌شود (پورقاسمی، ۲۰۱٥).

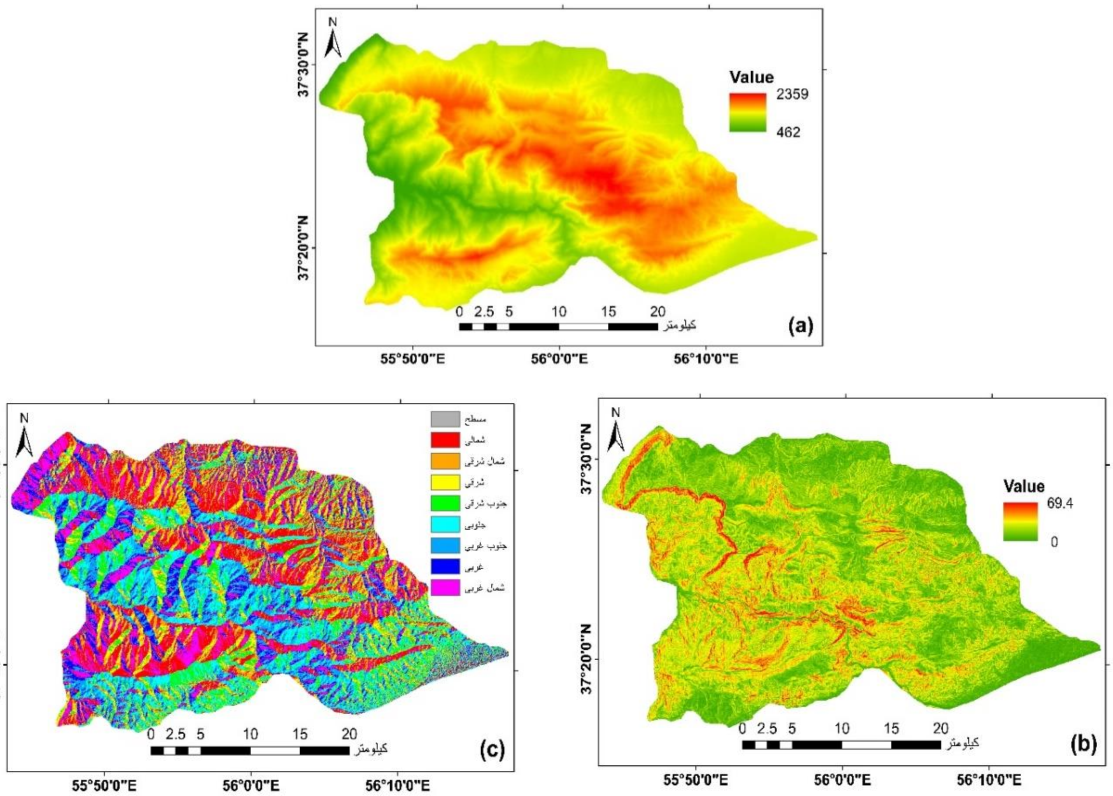
۳- نتایج

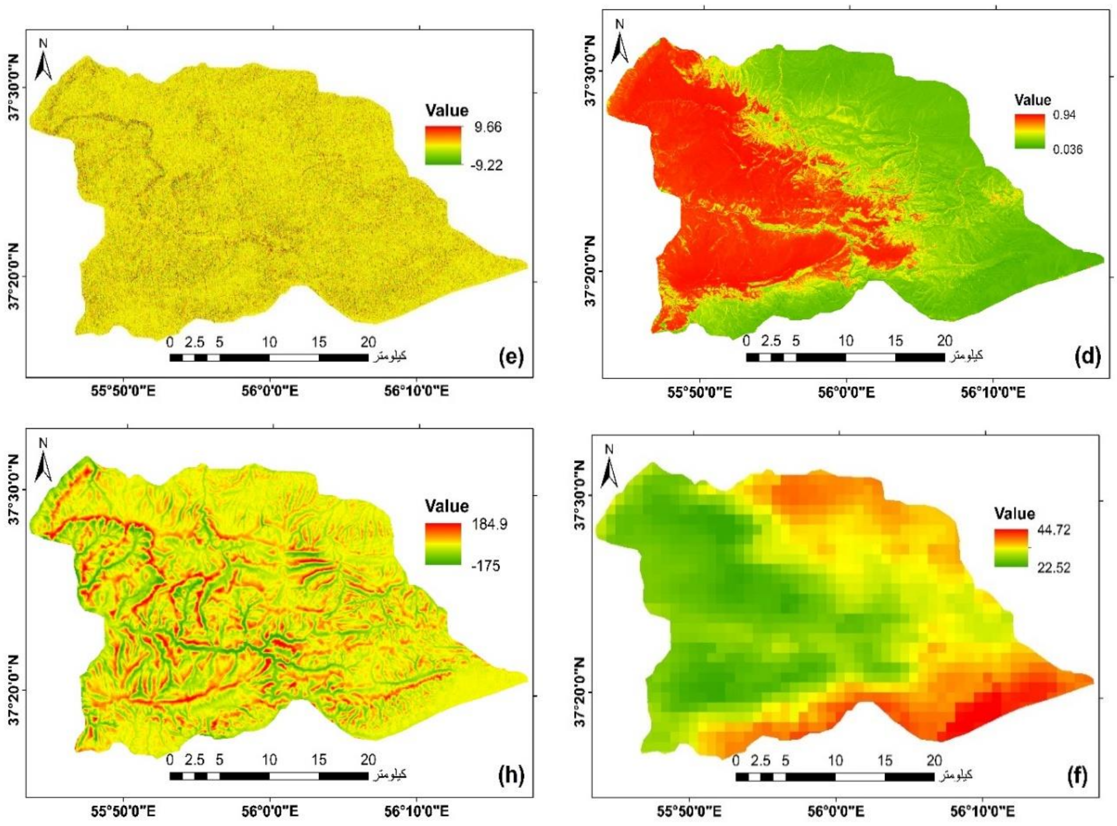
عوامل ۹ گانه مؤثر بر آتش‌سوزی که در این تحقیق مورداستفاده قرار گرفتند به‌صورت لایه‌های رستری و با اندازه پیکسل‌های یکسان تهیه شد. سری زمانی نقاط حریق بین سال‌های ۲۰۰٤ تا ۲۰۲۰ نیز از ماهواره مادیس توسط کدنویسی در سامانه گوگل ارث انجین استخراج (شکل ۲) و پس از انطباق با داده‌های مشاهدات زمینی گستره آن‌ها برای اهداف واسنجی و صحت‌سنجی مشخص شد. تعداد ۱۲۲ موقعیت آتش‌سوزی بین سال‌های ۲۰۰٤ تا ۲۰۲۰ استخراج شد که از ۷۰ درصد آن‌ها برای واسنجی و ۳۰ درصد برای صحت‌سنجی استفاده شد. لایه‌های موضوعی تولید شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

1 Chuvieco



شکل ۲- نقشه مناطق دچار آتش‌سوزی در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۰ مستخرج از سامانه گوگل ارث انجین در پارک ملی گلستان

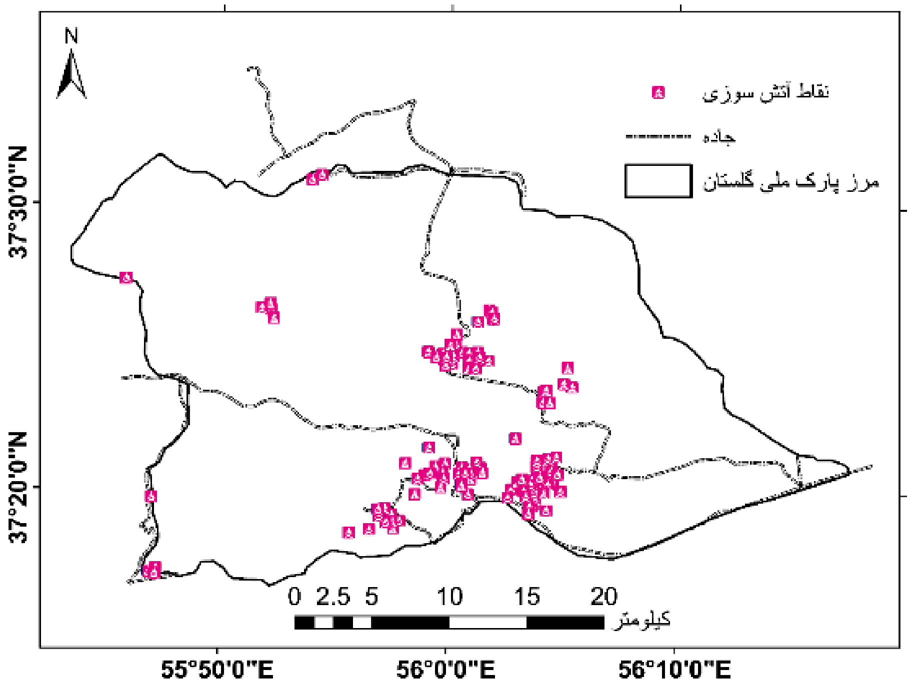




شکل ۳- نقشه‌های موضوعی پارک ملی گلستان شامل نقشه ارتفاعی (a)، نقشه شیب (b)، نقشه جهت شیب (c)، نقشه NDVI (d)، نقشه انحنای دامنه (e)، نقشه LST (f)، نقشه Wetness (g)، نقشه TPI (h)

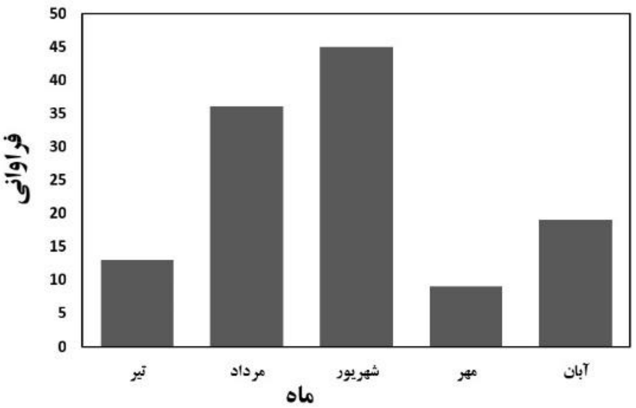
همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، ارتفاع پارک ملی گلستان بین ٤٦٢ تا ۲۳۵۹ متر از سطح دریا با میانگین ١٤٢٥ متر و حداکثر شیب طولی منطقه ٦٩/٤ درجه است. جهت دامنه‌ها عمدتاً شمالی (حدود ۳٤ درصد منطقه) و قسمت متراکم پوشش گیاهی در بخش غربی پارک و در محدوده استان گلستان قرار دارد. ازآنجایی‌که شاخص NDVI معادل عدد یک، بیانگر پوشش کاملاً متراکم است، وجود مقادیر بالاتر از ۰/۵ در بخش بزرگی از منطقه بیانگر پوشش جنگلی است. بررسی نقشه‌های کاربری اراضی رقومی شده نیز نشان می‌دهد حدود ٤٧/٥ درصد از پارک پوشیده از جنگل متراکم، ۳۳ درصد جنگل تنک و مابقی به بیشه‌زارها و مراتع اختصاص دارد. در مورد شاخص انحنای دامنه نیز با توجه به اینکه مقادیر مثبت و منفی به ترتیب بیانگر شیب‌های محدب و مقعر است، علیرغم دامنه تقریبی ۹- تا ۹+ این شاخص، مقدار میانگین ۰/۰۲۸- و بررسی هیستوگرام شاخص در هر پیکسل نشان‌دهنده آن است که بیشتر دامنه‌ها دارای شیب یکنواختی هستند. بررسی نقشه LST نیز نشان می‌دهد این متغیر تقریباً بین ۲۲/٥ تا ٤٤/٧ درجه با میانگین ۳۱/٤ در قسمت‌های مختلف منطقه نوسان داشته و مقادیر کم در قسمت غربی پارک نشان‌دهنده اثر تعدیلی جنگل‌های متراکم بر دما است و طبیعی است که بخش شرقی منطقه که جنگل کم تراکم و

بیشه‌زارها را به خود اختصاص می‌دهد دمای بالاتری را نشان دهد. نقشه TWI نیز حداقل مقدار ۲/۵۳ و حداکثر ١٦/٧ را نشان می‌دهد که مقدار عددی متوسط ٦/١٧ بیانگر شرایط زهکشی متوسط است. لایه موضوعی TPI (شکل h) نیز شاخص موقعیت توپوگرافی را نشان می‌دهد که بین ۱۸۵- تا ۱۸۵+ با میانگین ۱/۰۵- متغیر بوده که نشان‌دهنده این است که به‌صورت معمول منطقه دارای شیب‌های میانی، یال‌های موضعی و دره‌های باریک u شکل است. با توجه به گزارش‌های فنی قبلی ازجمله گزارش منتشر شده توسط مرکز پژوهش‌های مجلس (۱۳۹۹) که عامل انسانی را یکی از دلایل اصلی بروز آتش‌سوزی‌ها عنوان نموده است، نقشه موضوعی فاصله از جاده و حریق‌های ثبت شده به‌صورت نقشه جداگانه در شکل ٤ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اکثر آتش‌سوزی‌های رخ داده در حاشیه یا فاصله نزدیکی از جاده‌ها به وقع پیوسته‌اند که احتمال منشأ انسانی (عمدی یا غیرعمدی) آن‌ها را تقویت می‌کند. بخصوص قسمت جنوبی پارک که جاده آسیایی گرگان- مشهد از بین آن می‌گذرد و میزان توقف و اسکان مسافران و گردشگران بسیار زیاد است.



شکل ٤- نقشه پراکنش جاده در سطح پارک و مناطق دچار آتش‌سوزی در سال‌های ۲۰۰٤ تا ۲۰۲۰ در پارک ملی گلستان

پراکنش زمانی آتش‌سوزی‌های مورد بررسی در ماه‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در ماه‌های تیر الی آبان که مصادف با دمای بالا، پوشش گیاهی و زیر اشکوب جنگلی متراکم‌تر و تردد بالای گردشگران است، فراوانی آتش‌سوزی‌ها بیشتر است. این موضوع فرض تلفیق دلایل طبیعی و غیرطبیعی به‌عنوان منشأ بروز و گسترش حریق را تقویت می‌کند. علی نیا و همکاران (۱٤۰۰) نیز فراوانی وقوع حریق‌های ماه خرداد تا شهریور را در مراتع، جنگل‌ها و اراضی زراعی لرستان گزارش نموده بودند. بروز آتش‌سوزی در ماه مهر و آبان نیز با کاهش رطوبت نسبی هوا و وزش بادهای گرم موسمی مرتبط است که در گزارش مرکز پژوهش‌های مجلس (۱۳۹۹) اشاره شده است.



شکل ۵- تعداد وقایع حریق رخ داده مورد بررسی در ماه‌های مختلف بین سال‌های ۲۰۰٤ تا ۲۰۲۰

برای درک ارتباط بین متغیرهای مورد بررسی و آتش‌سوزی‌های رخ داده، با برش فایل رستری لایه‌های موضوعی با مرز حریق‌های تاریخی در سامانه گوگل ارث انجین، به بررسی متغیرها در پیکسل‌های دچار حریق پرداخته شده است که نتایج آن در جدول ۱ ملاحظه می‌شود. برای تبیین تغییر میانگین متغیرها در مناطق دچار حریق نسبت به میانگین شرایط پارک از روش شکستگی‌های طبیعی (جنکز) استفاده شده است. بدین ترتیب که دامنه حداقل و حداکثر متغیر به ۵ طبقه تقسیم شده و مقایسه صورت می‌پذیرد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود فقط در مورد متغیر ارتفاع و شیب، تغییر طبقه صورت گرفته است و بدین معناست که فقط میانگین دو پارامتر ارتفاع و شیب مناطق دچار حریق نسبت به میانگین شرایط پارک متفاوت بوده و سایر پارامترها تغییر خاصی نداشته‌اند.

البته دو عامل جهت دامنه و شاخص NDVI قابل تبیین با روش جنکز نیستند و با بررسی تعداد پیکسل‌های جهت‌های مختلف استنباط شد که کماکان جهت دامنه‌های شمالی جهت غالب بوده و برای شاخص NDVI هم مقادیر میانگین حدود ۰/٤۸ محدوده پوشش جنگلی و بیشه‌زارهای متراکم است که تغییری نیافته است.

جدول ۱- مقادیر میانگین، حداقل و حداکثر متغیرهای مورد بررسی در سطح پارک و در محدوده حریق‌های تاریخی

متغیر	واحد	سطح پارک ملی گلستان			طبقه	سطح حریق‌های مشاهداتی			طبقه
		میانگین	حداقل	حداکثر		میانگین	حداقل	حداکثر	
ارتفاع	متر	۱٤۲٥	٤٦۲	۲۳٥۹	۳	۱٦۱٥	۸۷۳	۲۲۸۰	٤
شیب	درجه	۱٦/۷۹	۰	٦۹/٤٤	۲	۱۷/۳۱	۰	٦٥/٦۳	۳
جهت	-	شمالی (۳۳/۷درصد)- جنوبی (۳۰درصد)- غربی (۱۸/٤درصد)- شرقی (۱۷/۸درصد)			-	شمالی (۳۸درصد)- جنوبی (۲٦درصد)- غربی (۱۹درصد)- شرقی (۱۷درصد)			-
انحنای دامنه	-	-۰/۰۲۸	-۹	+۹	۳	۰/۰۱۲	-٥/۰۲	٥/۱	۳
NDVI	-	۰/٥	۰/۰۳٦	۰/۹٤	-	۰/٤۸	۰/۰۷۳	۰/۹۲	-
TPI	-	-۱/۰٥	-۱۸٥	+۱۸٥	۳	٤/٦۸	-۱۲٦٦	۱۷۰/٤	۳
TWI	-	٦/۱۷	۲/٥۳	۱٦/۷	۲	٦/۱	۲/٦٤	۱٦	۲
LST	سلسیوس	۳۱/٤	۲۲/٥	٤٤/۷	۳	۳۱/۹	۲٤/۲۷	٤۰/۸٤	۳

در روش AHP فازی، بعد از مرور عوامل مؤثر در آتش‌سوزی‌ها و تعیین وزن هر متغیر توسط منابع و مستندات، ماتریس مقایسات زوجی به‌عنوان ورودی به ابزار تشکیل و نرخ سازگاری با عدد ۰/۰۸ به دست آمد که با توجه به اینکه کمتر از عدد ۰/۱ است ماتریس به دست آمده قابل‌قبول می‌باشد. وزن‌های به دست آمده از ماتریس مقایسات زوجی برای تهیه معادله خطر آتش‌سوزی (معادله ۸) در نرم‌افزار Terrset مورداستفاده قرار گرفت. پیکسل‌های خروجی به‌صورت طبقه‌بندی شده در ٥ طبقه استخراج که مساحت هر طبقه در جدول ۲ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که حدود ۳۲ درصد پارک در این روش، پتانسیل زیادی در بروز آتش‌سوزی داشته و تقریباً نیمی از پارک خطر آتش‌سوزی متوسط به پایین (٤۷/۸ درصد) و نیمی دیگر (٥۲/۲ درصد) دارای خطر متوسط به بالا هستند.

$$FR_{FAHP} = 0.2967D + 0.18LST + 0.1746N + 0.1029S - 0.0862TW + 0.0823A + 0.0332H + 0.0204C - 0.0237TP \quad (۸)$$

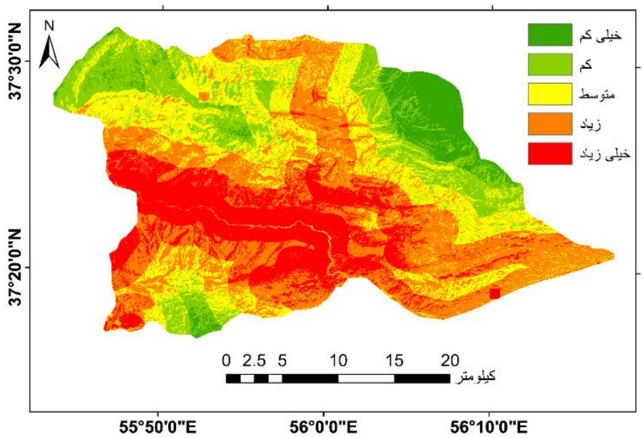
که FR خطر آتش‌سوزی،D فاصله از جاده، LST دمای سطحی، N شاخص NDVI، S شیب دامنه، TW شاخص TWI، A جهت دامنه، H ارتفاع، C عامل انحنای دامنه و TP شاخص TPI است.

همان‌طور که در معادله ۸ مشخص است، عوامل فاصله از جاده (با ضریب ۰/۲۹)، دمای سطحی (۰/۱۸) و تراکم پوشش گیاهی (۰/۱۷) از مؤثرترین عوامل بروز و گسترش حریق در پارک محسوب می‌شوند و ضرایب بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند.

جدول۲- مساحت طبقات خطر آتش‌سوزی در روش فازی سلسله مراتبی

درجه خطر آتش‌سوزی	مساحت (کیلومترمربع)	درصد	درصد تجمعی
خیلی کم	٥۷/۲٦	٦/٦۷	٦/٦۷
کم	۱٤۳/٤٥	۱٦/۷۲	۲۳/٤
متوسط	۲۰۹/٤۸	۲٤/٤۲	٤۷/۸
زیاد	۲۷۷/۲	۳۲/۳	۸۰/۱
خیلی زیاد	۱۷۰/٥۸	۱۹/۸۸	۱۰۰

نقشه طبقات خطر روش فازی سلسله مراتبی در شکل ٦ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که به دلیل اثر بالای جاده و تراکم پوشش گیاهی، مناطق مرکزی، جنوبی و غربی پارک مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد آتش‌سوزی را به خود اختصاص داده و نیمه شمالی پارک درجات کمتری از خطر را نشان داده است.



شکل ٦- نقشه طبقات خطر روش فازی سلسله مراتبی در پارک ملی گلستان

در روش رگرسیون لجستیک، لایه‌های رستری موضوعی به‌عنوان متغیرهای مستقل و مناطق دچار حریق تاریخی به‌عنوان متغیر وابسته (با ارزش عددی یک) در مرحله واسنجی برای مدل‌سازی رگرسیون وارد نرم‌افزار Terrset شد. معادله به دست آمده به‌صورت معادله ۹ است. سپس پیکسل‌های خروجی به‌صورت طبقه‌بندی شده در ٥ طبقه استخراج که مساحت هر طبقه در جدول ۳ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که تنها حدود ۱۱ درصد مساحت پارک در این روش، پتانسیل زیاد و خیلی زیاد در بروز و گسترش آتش‌سوزی داشته و حدود ۸۹ درصد پارک، خطر متوسط به پایینی در بروز و گسترش آتش‌سوزی دارند.

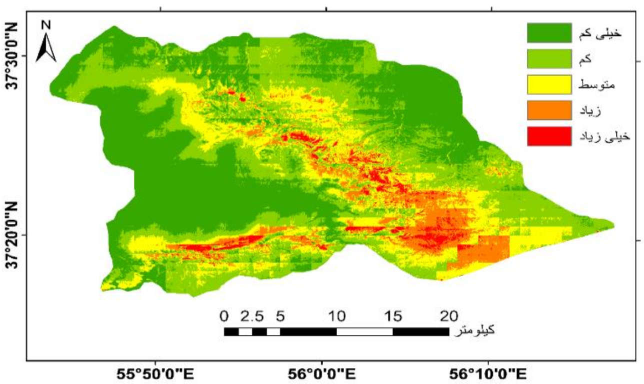
$$FR_{LOG} = -14.6385 + 0.2D + 0.213527LST + 3.085010N + 0.006821S - 0.020914TW + 0.000279A + 0.002415H + 0.018821C - 0.002181TP \quad (۹)$$

که مخفف‌های هر پارامتر مشابه معادله ۸ است. در معادله ۹ نیز با توجه به ضرایب اختصاص یافته می‌توان مشابه روش فازی سلسله مراتبی تأثیر عوامل فاصله از جاده، دمای سطحی و تراکم پوشش گیاهی را مشاهده نمود. با این تفاوت که به ترتیب عامل پوشش گیاهی (۳/۰۸)، دمای سطحی (۰/۲۱) و در رتبه بعدی، فاصله از جاده (۰/۲) وزن بیشتری را کسب نموده‌اند. سایر عوامل نیز با ضرایب کمتر و دارای اثرات مثبت (مثل شیب، ارتفاع، جهت و انحنای دامنه) و منفی (عوامل TWI و TPI) در تهیه نقشه نهایی خطر مورداستفاده قرار می‌گیرند.

جدول۳- مساحت طبقات خطر آتش‌سوزی در روش رگرسیون لجستیک

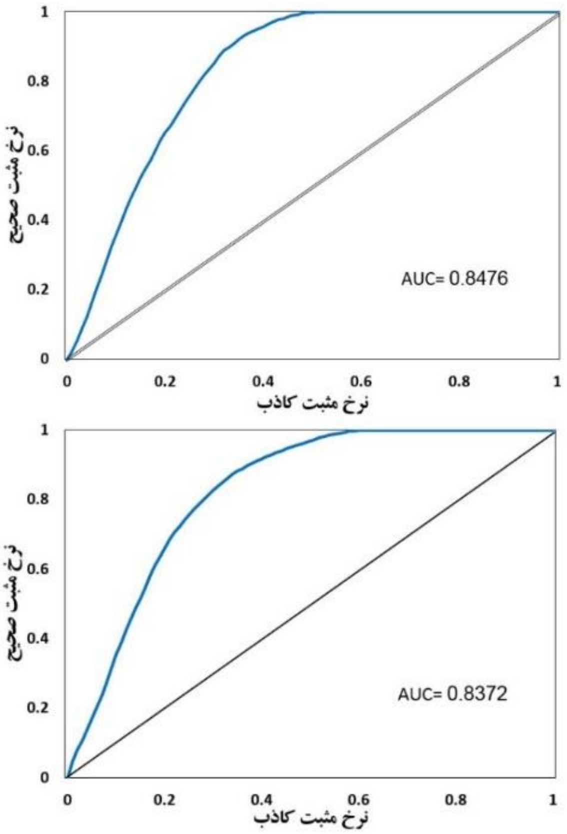
درجه خطر آتش‌سوزی	مساحت (کیلومترمربع)	درصد	درصد تجمعی
خیلی کم	۳٤٤/۲۸	٤۰/۱۵	٤۰/۱۵
کم	۲۷٤/۵۸	۳۲/۰۲	۷۲/۲
متوسط	۱٤۹/۳	۱۷/٤۱	۸۹/٦
زیاد	۷۰/۰۲	۸/۱٦	۹۷/۷
خیلی زیاد	۱۹/۳۱	۲/۲٥	۱۰۰

نقشه طبقات خطر روش رگرسیون لجستیک (شکل ۷) نشان می‌دهد که به دلیل رطوبت بالا و دمای سطحی متعادل‌تر در قسمت مرکزی پارک، مناطق با خطر کم، وسعت بیشتری دارند و مناطقی که در حاشیه جنگل‌های متراکم‌تر قرار داشته و دمای سطحی بیشتر و رطوبت کمتری را تجربه نموده و در حاشیه جاده نیز قرار دارند، خطر بروز و گسترش بیشتری از حریق را نشان می‌دهند.



شکل ۷- نقشه طبقات خطر روش رگرسیون لجستیک در پارک ملی گلستان

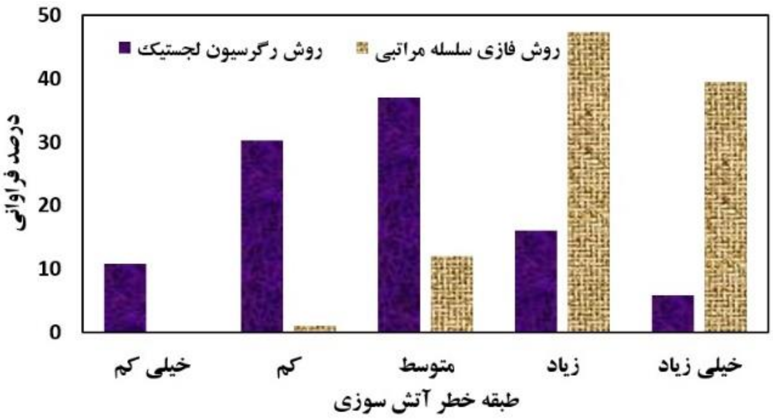
در شکل ۸ منحنی مشخصه عملکرد و سطح زیر نمودار دو روش مورداستفاده در مرحله صحت سنجی نشان داده شده است. در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، سنجه سطح زیر نمودار عدد ۰/۸٤ و در روش رگرسیون لجستیک عدد ۰/۸۳ ملاحظه می‌شود که صحت پیش‌بینی را مشابه یکدیگر و سطح "خیلی خوب" توصیف می‌کنند.



شکل۸- منحنی مشخصه عملکرد در روش سلسله مراتبی فازی (راست) و روش رگرسیون لجستیک (چپ)

ازآنجاکه مقادیر سنجه مزبور مشابه یکدیگر است،به مقایسه فراوانی پیکسل‌های مناطق حریق مرحله صحت‌سنجی در طبقه‌های مختلف در دو روش نیز پرداخته شده است که نتایج آن در شکل ۹ ملاحظه می‌شود. همان‌طور که مشهود است، روش فازی سلسله مراتبی حدود ۸۷ درصد پیکسل‌های مناطق دارای حریق تاریخی مرحله صحت‌سنجی را در طبقه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد پوشش داده است؛ درصورتی‌که این مقدار در روش رگرسیون لجستیک حدود ۲۲ درصد است. از طرفی روش رگرسیون لجستیک حدود ٤۱ درصد منطقه را در محدوده

طبقه با خطر کم و خیلی کم توجیه نموده که با توجه به قابلیت اشـــتعال بالای منطقه از لحاظ پوشـــش گیاهی و دما منطقی نیست.



شکل ۹- مقایسه درصد فراوانی کلاس‌های مختلف خطر آتش‌سوزی در دو روش مورد مقایسه

٤- نتیجه‌گیری

مدل‌ســازی و پهنه‌بندی خطر وقوع حریق، یکی از ملاحظات مخاطرات منابع طبیعی در هر منطقه اســت. در این مقاله به مقایســه دو مدل شـامل رگرسـیون لجسـتیک و مدل ترکیبی فازی سـلسـله مراتبی در پهنه‌بندی طبقات مختلف آتش‌ســوزی و تعیین عوامل مؤثر در این مخاطره محیط زیســتی پرداخته شــد. جهت دســترســی به ســوابق تاریخی آتش‌سـوزی‌های منطقه از سـامانه پردازش ابری گوگل ارث انجین اسـتفاده شـد. بررسـی نتایج ضـرایب عوامل ۹ گانه مورد بررسی در هر دو مدل نشان داد نزدیکی به جاده، دمای سطحی و NDVI از مهم‌ترین عوامل در بروز و گسترش حریق‌ها بوده اســت. یاتیش و همکاران (۲۰۱۹) نیز در تحقیق خود به نقش مؤثر NDVI و دمای ســطحی در بروز و گسترش حریق اشـاره نموده‌اند. همچنین در مورد اهمیت عامل نزدیکی به جاده و عدم تأثیر بالای شـاخص TWI در نتایج مدل، پیائو و همکاران (۲۰۲۲) نیز به نتیجه مشـابهی رسـیده‌اند. در مورد دو عامل ارتفاع و شـیب، علیرغم وجود ضریب بالا در معادلات نهایی، ملاحظه شد که میانگین ارتفاع و شیب‌هایی که حریق در آن‌ها رخ داده، کمی بیشتر از میانگین منطقه اســت. این موضــوع را منابع متعدد ازجمله پیائو و همکاران (۲۰۲۲)، اسـکندری و میسـل (۲۰۱۷) و حیدری و همکاران (١٤٠٠) و جانباز قبادی (۱۳۹۸) نیز عنوان نموده بودند. علیرغم اینکه هر دو مدل منحنی مشخصه عملکرد و سطح زیر نمودار مشابهی داشتند، بررسی پیکسل‌های مناطق دچار حریق در مرحله صحت‌سنجی نشان داد که نتایج روش تحلیل سلسله مراتبی فازی منطقی‌تر از روش رگرسیون لجستیک است. چون حدود ۸۷ درصد مناطق

دارای حریق در طبقات با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند؛ درحالی‌که این مقدار برای روش رگرسیون لجستیک حدود ۲۲ درصد است. اردین و چاگلار (۲۰۲۱) نیز نتایج روش تحلیل سلسله مراتبی فازی را بسیار منعطف و قابل‌قبول عنوان نموده‌اند. ازآنجایی‌که در فازی نمودن لایه‌های مورد بررسی از تابع عضویت فازی خطی استفاده شده است، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی به سایر توابع عضویت و مقایسه آن‌ها پرداخته شود. همچنین بررسی نقشه طبقات خطر در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی نشان می‌دهد که قسمت‌های مرکزی و جنوبی پارک که بیشتر جنبه تفرجگاهی داشته و دسترسی مناسبی از جاده‌ها دارند در طبقه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند. این موضوع لزوم فرهنگ‌سازی گردشگری، پایش مستمر مأموران محیط‌بانی و استقرار پایگاه‌های کمک‌رسانی در این مناطق در ماه‌های خرداد تا آبان را مضاعف می‌سازد.

کتابنامه

ابراهیمی، حمید؛ رسولی، علی‌اکبر؛ مختاری، داوود؛ ۱۳۹۷. بررسی تغییرات خطر آتش‌سوزی و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از مدل حداکثر بی نظمی، مطالعه موردی: جنگل ها و مراتع استان آذربایجان شرقی. جغرافیا و مخاطرات محیطی. دوره ۷. شماره ۱. صص ۷۳-۵۷. https://doi.org/10.22067/geo.v7i1.59628

اسکندری، سعیده؛ اسکندری، سمانه؛۱٤۰۰. آتش‌سوزی جنگل‌های ایران، پیامدها، روش‌های مقابله و راهکارها. انسان و محیط‌زیست. شماره ٥٦. صص ۱۸۷-۱۷٥. https://he.srbiau.ac.ir/article_10459.html

جانباز قبادی، غلامرضا؛ ۱۳۹۸. بررسی مناطق خطر آتش‌سوزی جنگل در استان گلستان بر اساس شاخص خطر آتش-سوزی با بهره‌گیری از تکنیک GIS. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. دوره ٦. شماره ۳. صص ۱۰۲-۸۹. https://doi.org/10.29252/jsaeh.6.3.89

حیدری، مهدی؛ عطار روشن، سینا؛ جافریان، الهام؛ عبیات، محمد؛ ۱٤۰۰. مدل‌سازی و پهنه‌بندی مناطق مستعد آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی بر پایه رگرسیون لجستیک. *جغرافیا و مخاطرات محیطی. دوره ۱۰. شماره ۲. صص ٥۸-٤۳.*
https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.68903.1019

زارع چاهوکی، محمدعلی؛ ۱۳۹۸. معیارها و شاخص‌های مؤثر در ارزیابی پایداری منابع طبیعی. *پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی*. دوره ٤. شماره ۱. صص ۱٦-۱.
http://srj.asnr.ias.ac.ir/article_112964_620d4cfa05028856720ee893aabffde8.pdf

شریف نژاد، طوبی؛ خاوریان نهزک، حسن؛ ورامش، سعید؛ ۱٤۰۰. ارزیابی قابلیت محصولات آتش سنجنده مادیس در شناسایی آتش‌سوزی‌ها در استان گلستان. *مخاطرات محیط طبیعی*. دوره ۱۰. شماره ۳۰. صص ۱٦-۱. https://doi.org/10.22111/jneh.2021.34138.1661

عابدی قشلاقی، حسن؛ ولی زاده، خلیل؛ ۱۳۹۷. ارزیابی و پهنه بندی خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و GIS. *مخاطرات طبیعی*. دوره ۷. شماره ۱٥. صص ٦٦-٤۹.
https://doi.org/10.22111/jneh.2017.3204

علی‌نیا، اکرم؛ گندمکار، امیر؛ عباسی، علیرضا؛ ۱۴۰۰. تحلیل زمانی – مکانی رخدادهای مخاطره آتش‌سوزی‌های طبیعی در استان لرستان با استفاده از محصولات سنجندهٔ مادیس. *جغرافیا و پایداری محیط*. دوره ۱۱. شماره ۱. صص ۱۲۷–۱۱۳.
https://doi.org/10.22126/ges.2021.6469.2392
مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی؛ ۱۳۹۹. علل، آثار، چالش‌ها و راهکارهای مقابله با آتش‌سوزی‌های جنگل‌ها و مراتع کشور. معاونت پژوهش‌های تولیدی و زیربنایی. شماره مسلسل: ۱۷۲۸۸. ٦٥ ص.
https://rc.majlis.ir/fa/report/show/1632235

Abedi Gheshlaghi, H., Feizizadeh, B., Blaschke, T., 2020. GIS-based forest fire risk mapping using the analytical network process and fuzzy logic. Journal of Environmental Planning Management, 63, 481–499. https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1594726

Abedi, R., 2022. Application of multi-criteria decision making models to forest fire management. International Journal of Geoheritage and Parks, 10 (1): 84-96. https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.02.005

Ågren, A.M., Lidberg, W., Strömgren, M., Ogilvie, J., Arp, P.A., 2014. Evaluating digital terrain indices for soil wetness mapping–a Swedish case study. Hydrology and Earth System Sciences. 18(9): 3623–34. https://doi.org/10.5194/hess-18-3623-2014, 2014

Ajin, R.S., Loghin, A.M., Vinod, P.G., Jacob, M.K., 2017. Forest fire risk zone mapping using RS and GIS techniques a study in Achankovil Forest Division, Kerala, India. Journal of Earth, Environment and Health Sciences, 23: 109–115. https://doi.org/10.4103/2423-7752.199288

Ayanlade, A., 2016. Variation in diurnal and seasonal urban land surface temperature: landuse change impacts assessment over Lagos metropolitan city. Modeling Earth Systems and Environment. 2, 193.https://doi.org/10.1007/s40808-016-0238-z

Busico, G., Giuditta, E., Kazakis, N., Colombani, N., 2019. A Hybrid GIS and AHP Approach for Modelling Actual and Future Forest Fire Risk Under Climate Change Accounting Water Resources Attenuation Role. Sustainability. 11(24), 7166. https://doi.org/10.3390/su11247166

Cavdaroglu, G., 2021. Google Earth Engine Based Approach for Finding Fire Locations and Burned Areas in Muğla, Turkey. American Journal of Remote Sensing. 9 (2): 72-77.https://doi.org/10.11648/j.ajrs.20210902.12

Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M.P., Vilar, L., Martínez-Vega, J., Martín, S., Ibarra, P., et al. 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. Ecological Modelling. 221: 46–58.https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017

Çolak, E., Sunar, F., 2020. Evaluation of forest fire risk in the Mediterranean Turkish forests: A case study of Menderes region, Izmir. International Journal of Disaster Risk Reduction. 45, 101479.https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101479

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., Böhner, J., 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007. https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015

Erdin, C., Çağlar, M., 2021. Rural Fire Risk Assessment in GIS Environment Using Fuzzy Logic and the AHP Approaches. Polish Journal of Environmental Studies, 30(6), 4971-4984. https://doi.org/10.15244/pjoes/136009

Eskandari, S., Miesel, JR., 2017. Comparison of the fuzzy AHP method, the spatial correlation method, and the Dong model to predict the fire high-risk areas in Hyrcanian forests of Iran. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8:2, 933-949.https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1289249

Faramarzi, H., Hosseini, SM., Pourghasemi, HR., Farnaghi, M., 2021. Forest fire spatial modelling using ordered weighted averaging multi-criteria evaluation. Journal of Forest Science, 67, 87−100. https://doi.org/10.17221/50/2020-JFS

Fassnacht, F., Schmidt-Riese, E., Kattenborn, T., Hernández, J., 2021. Explaining Sentinel 2-based dNBR and RdNBR variability with reference data from the bird's eye (UAS) perspective. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 95, 102262.https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102262

Giglioa, L., Descloitresa, J., Justicec, C., Kaufman, Y.J., 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. Remote Sensing of Environment. 87: 273–282.https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00184-6

Hislop, S., Haywoodc, A., Jonesa, S., Soto-Berelova,M., Skidmore A., Nguyena, T., 2020. A satellite data driven approach to monitoring and reporting fire disturbance and recovery across boreal and temperate forests. International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation. 87. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102034

Jaafari, A., Mafi-Gholami, D., Pham, B.T., Tien Bui, D., 2019. Wildfire probability mapping: Bivariate vs. multivariate statistics. Remote Sensing. 11, 618. https://doi.org/10.3390/rs11060618

Li, J., Zhao, Y., Zhang, A., Song, B., Hill, R.L., 2021. Effect of grazing exclusion on nitrous oxide emissions during freeze-thaw cycles in a typical steppe of Inner Mongolia. Agriculture Ecosystem Environment. 307, 107217. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107217

Masinda, M.M., Sun, L., Wang, G., Hu, T., 2021. Moisture content thresholds for ignition and rate of fire spread for various dead fuels in northeast forest ecosystems of China. Journal of Forestry Research. 32: 1147–1155. https://doi.org/10.1007/s11676-020-01162-2

Mattivi, P., Franci, F., Lambertini, A. Bitelli, G., 2019. TWI computation: a comparison of different open source GISs. Open Geospatial Data, Software and Standards. 4, 6. https://doi.org/10.1186/s40965-019-0066-y

Novo, A., Fariñas-Álvarez, N., Martínez-Sánchez, J., González-Jorge, H., Fernández-Alonso, JM., Lorenzo, H., 2020. Mapping forest fire risk—a case study in Galicia (Spain). Remote Sensing. 12(22):1–20. https://doi.org/10.3390/rs12223705

Nuthammachot, N., Stratoulias, D. 2021. A GIS-and AHP-based approach to map fire risk: A case study of Kuan Kreng peat swamp forest, Thailand. Geocarto International., 36, 212–225.https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1611946

Pham, B.T., Jaafari, A., Phong, T.V., Yen, H., Tuyen, T., Luong, V., Nguyen, H.D., Le, H.V., Foong, L.K., 2021. Improved flood susceptibility mapping using a best first decision tree integrated with ensemble learning techniques. Geoscience Frontiers. 12, 101105.https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.11.003

Piao, Y., Lee, D., Park, S., Gul, H. Jin, Y., 2022. Forest fire susceptibility assessment using google earth engine in Gangwon-do, Republic of Korea. Geomatics, Natural Hazards and Risk. 13(1): 432-450. https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2030808

Pourghasemi, H.R., 2015. GIS-based forest fire susceptibility mapping in Iran a comparison between evidential belief function and binary logistic regression models. Scandinavian Journal of Forest Research, 9(3), 155–165. https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1052750

Pourghasemi, H.R., Beheshtirad, M., Pradhan, B., 2016. A comparative assessment of prediction capabilities of modified analytical hierarchy process (MAHP) and Mamdani fuzzy

logic models using Netcad-GIS for forest fire susceptibility mapping. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7(2):861–885. https://doi.org/10.1080/19475705.2014.984247

Saaty, L.T., 1984. The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments. In: Avenhaus, R., Huber, R.K. (eds) Quantitative Assessment in Arms Control. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2805-6_12

Tomar, J.S., Kranjcic, N., Đurin, B., Kanga, S., Singh, S.K. 2021. Forest Fire Hazards Vulnerability and Risk Assessment in Sirmaur District Forest of Himachal Pradesh (India): A Geospatial Approach. ISPRS International Journal of Geo-Information. 10, 447. https://doi.org/10.3390/ijgi10070447

Venkatesh, K., Preethi, K., Ramesh, H., 2020. Evaluating the effects of forest fire on water balance using fire susceptibility maps. Ecological Indicators. 110, 105856.https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105856

Yathish, H., Athira, K.V., Preethi, K., Pruthviraj, U., Shetty, A., 2019. A Comparative Analysis of Forest Fire Risk Zone Mapping Methods with Expert Knowledge. Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 47: 2047-2060. https://doi.org/10.1007/s12524-019-01047-w

Zareian, G.R., Azadi, A. and Shakeri, S., 2021. Evaluation of soil fertility map for bean cultivation in Eghlid Plain by using Hybrid Fuzzy-AHP and GIS techniques. Iran Agricultural Research, 40(1):101-112. https:// iar.shirazu.ac.ir/ article_ 6291_ 533038d9a 7eeebb64d797f9eb3b6d291.pdf?lang=fa